

自动控制

原理与技术

黄晓红 滕立国 莫怀训 主编



中国科学技术出版社

自动控制原理与技术

黄晓红 滕立国 莫怀训 主编

中国科学技术出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理与技术/黄晓红, 滕立国, 莫怀训主编.
—北京: 中国科学技术出版社, 2008. 8

ISBN 978-7-5046-5234-8

I. 自… II. ①黄…②滕…③莫… III. 自动控制理论—
高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 108616 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081
科学普及出版社发行部发行
北京正道印刷厂印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 15.75 字数: 390 千字
2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 32.00 元
ISBN 978-7-5046-5234-8/TP·356

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

前 言

为满足职业教育电类相关专业教学建设的需要,本教材立足职业教育的人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,体现了专业的系统性和完整性,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本书在内容编排上注意循序渐进,由浅入深,便于读者掌握。主要介绍经典控制理论的内容,加强了对基本理论及其应用的阐述,深入浅出地介绍了自动控制的基本概念。减少了公式和结论的理论推导过程。针对职业教育的特点,本书强调了对公式和结论应用能力的培养,而不强调其推导过程。由于计算机的迅速普及和应用,借助计算机进行控制系统的分析和设计已成为现实,因此本书引入了当今世界上最流行的、基于 MATLAB 的系统分析和设计的内容,使学生在掌握基本概念的同时,还能掌握一种有力的工具。这也为教师进行 CAI 教学提供了条件。

本书可作为高等职业院校、大专院校、中等职业院校、电大和业余大学自动化、电气技术、智能楼宇、机电一体化及相近专业的自动控制及类似课程的选用教材,也可供电气工程技术人員参考。

本书编写人员来自广东轻工职业技术学院、广东轻工职业技术学校、广东技术师范学院、河南新乡学院、江苏常州机电职业技术学院、武汉工程职业技术学院、承德石油学院、华南理工大学等单位,均长期从事职业教育,有企业工作经历,具有丰富的教学经验和实践能力。本书由黄晓红、滕立国、莫怀训任主编,由范伟、王诗军、徐秀芬任副主编,李传军、颜学定等参与编写工作。华南理工大学余文杰教授担任主审。华南理工大学蒋春林负责校稿工作。

本书在编写过程中,得到了许多单位的大力支持,特别是余文杰教授仔细审阅了全稿,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,殷切希望使用本书的师生及广大读者批评指正。

编 者
2008 年 5 月

编辑委员会

主 编	黄晓红	滕立国	莫怀训
副 主 编	范 伟	王诗军	徐秀芬
编委会成员	李传军	颜学军	
主 审	余文杰		
校 稿	蒋春林		

目 录

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 自动控制的基本概念	(3)
1.2.1 人工控制与自动控制	(3)
1.2.2 开环控制系统	(4)
1.2.3 闭环控制系统	(6)
1.2.4 自动控制系统的特征和定义	(7)
1.3 自动控制系统的组成	(8)
1.3.1 基本组成部分	(8)
1.3.2 自动控制系统中常用的名词术语	(8)
1.4 自动控制系统的分类	(9)
1.4.1 按输入信号的特征分类	(9)
1.4.2 按描述元件的动态方程分类	(10)
1.4.3 按信号的传递是否连续分类	(10)
1.4.4 按系统的参数是否随时间而变化分类	(10)
1.5 自动控制系统的实例	(10)
1.5.1 蒸汽机转速自动控制系统	(10)
1.5.2 炉温自动控制系统	(11)
1.5.3 导弹发射架的方位控制系统	(12)
1.5.4 船舶随动舵的控制系统	(13)
1.5.5 火炮、雷达天线的方位控制系统	(14)
1.6 对自动控制系统的基本要求及本课程的研究内容	(15)
1.6.1 对自动控制系统的基本要求	(15)
1.6.2 本课程的研究内容	(16)
1.7 计算机辅助设计与仿真工具 MATLAB 软件简介	(16)
1.7.1 MATLAB 的操作界面简介	(18)
1.7.2 MATLAB 中的命令和函数	(19)

1.7.3	MATLAB 中的常量和变量	(21)
1.7.4	MATLAB 中的运算符	(21)
1.7.5	绘制响应曲线	(24)
1.7.6	SIMULINK 简介	(25)
	本章小结	(29)
	习题	(29)
2	自动控制系统的数学模型	(32)
2.1	控制系统的微分方程	(32)
2.1.1	线性元件的微分方程	(32)
2.1.2	微分方程的增量化表示	(35)
2.1.3	非线性微分方程的线性化	(36)
2.1.4	线性系统微分方程的编写	(36)
2.2	传递函数	(38)
2.2.1	传递函数的概念和定义	(38)
2.2.2	用复数阻抗法求电网络的传递函数	(41)
2.2.3	关于传递函数的几点说明	(44)
2.3	控制系统的结构图及其等效变换	(50)
2.3.1	结构图的基本概念	(50)
2.3.2	结构图的组成和建立	(51)
2.4	自动控制系统的传递函数	(59)
2.4.1	系统的开环传递函数	(59)
2.4.2	闭环系统的传递函数	(59)
2.4.3	闭环系统的偏差传递函数	(60)
2.5	信号流图	(61)
2.5.1	信号流图采用的一些符号及术语	(62)
2.5.2	信号流图的等效变换法则	(62)
2.5.3	梅逊公式及其应用举例	(64)
	本章小结	(66)
	习题	(66)
3	自动控制系统的时域分析	(71)
3.1	稳定性和代数稳定判据	(71)
3.1.1	稳定的概念和线性系统稳定的充要条件	(71)

3.1.2 劳斯稳定判据	(72)
3.1.3 劳斯稳定判据的应用	(74)
3.2 典型输入信号和阶跃响应性能指标	(79)
3.2.1 典型输入信号	(80)
3.2.2 阶跃响应性能指标	(81)
3.3 一阶系统的动态性能指标	(82)
3.3.1 一阶系统的瞬态响应	(82)
3.3.2 一阶系统的动态性能指标	(84)
3.4 二阶系统的动态性能指标	(84)
3.4.1 二阶系统的瞬态响应	(84)
3.4.2 二阶系统的动态性能指标	(89)
3.4.3 二阶系统动态性能指标与系统参数的关系	(93)
3.5 高阶系统的时域分析	(99)
3.5.1 闭环系统主导极点	(99)
3.5.2 高阶系统的主导极点分析	(100)
3.6 稳态误差分析	(101)
3.6.1 稳态误差的定义	(101)
3.6.2 控制系统的型别	(102)
3.6.3 给定输入信号作用下系统的稳态误差	(103)
3.6.4 扰动输入作用下系统的稳态误差	(106)
3.6.5 提高稳态精度的措施	(109)
3.7 控制系统时域分析的 MATLAB 实现	(112)
3.7.1 控制系统单位阶跃响应	(112)
3.7.2 控制系统单位冲激响应	(115)
3.7.3 系统在其他输入下控制系统时域响应	(116)
3.7.4 应用 Simulink 分析系统的时域响应	(119)
本章小结	(121)
习题	(121)
4 自动控制系统的根轨迹分析法	(126)
4.1 根轨迹分析法概述	(126)
4.1.1 根轨迹的概念	(126)
4.1.2 绘制根轨迹的相角条件和辐值条件	(127)
4.2 根轨迹的绘制方法	(129)

4.2.1 根轨迹的分支数	(129)
4.2.2 根轨迹的连续性和对称性	(129)
4.2.3 根轨迹的起点 ($k=0$) 和终点 ($k=\infty$)	(129)
4.2.4 实轴上的根轨迹	(129)
4.2.5 根轨迹的渐近线	(130)
4.2.6 根轨迹的分离点	(131)
4.2.7 根轨迹的起始角与终止角	(132)
4.2.8 根轨迹与虚轴的交点	(133)
4.3 根轨迹分析在 MATLAB 中的实现	(138)
4.3.1 绘制系统零极点图的函数 pzmap ()	(138)
4.3.2 绘制系统根轨迹的函数 rlocus ()	(139)
4.3.3 求取根轨迹上指定点处的增益函数 rolcfind ()	(142)
本章小结	(143)
习题	(144)
5 自动控制系统的频率特性分析法	(147)
5.1 频率特性的基本概念	(147)
5.1.1 频率特性的定义	(147)
5.1.2 频率特性的求取方法	(150)
5.1.3 频率特性的图示方法	(151)
5.2 典型环节的频率特性	(155)
5.2.1 比例环节	(155)
5.2.2 积分环节	(156)
5.2.3 微分环节	(157)
5.2.4 惯性环节	(158)
5.2.5 一阶微分环节	(160)
5.2.6 振荡环节	(161)
5.2.7 二阶微分环节	(163)
5.2.8 延迟环节	(164)
5.2.9 非最小相位环节	(165)
5.3 系统的开环频率特性	(166)
5.3.1 系统开环幅相频率特性的绘制	(167)
5.3.2 系统开环对数频率特性的绘制	(170)
5.4 奈奎斯特稳定判据	(177)

5.4.1	辅助函数和奈奎斯特稳定判据	(177)
5.4.2	奈奎斯特稳定判据在 I 型和 II 型中的应用	(179)
5.4.3	在伯德图上判别闭环系统的稳定性	(184)
5.4.4	多回路系统的稳定性分析	(185)
5.5	稳定裕度	(186)
5.5.1	相角裕度	(186)
5.5.2	幅值裕度	(187)
5.6	利用开环频率特性分析系统性能	(190)
5.6.1	$L(\omega)$ 低频渐近线与系统稳态误差的关系	(190)
5.6.2	$L(\omega)$ 中频段的斜率与系统稳定性的关系	(192)
5.6.3	开环频率特性和系统动态性能的关系	(195)
5.6.4	$L(\omega)$ 的高频段对系统性能的影响	(199)
5.6.5	结论	(200)
	本章小结	(200)
	习题	(201)
6	自动控制系统的校正	(205)
6.1	自动控制系统性能改善概述	(205)
6.1.1	自动控制系统校正的概念	(205)
6.1.2	校正的实质	(205)
6.1.3	校正方案的确定	(206)
6.1.4	系统性能指标的确定	(207)
6.2	提高系统准确性的校正方法	(207)
6.2.1	引入输入补偿方法	(207)
6.2.2	引入扰动补偿方法	(208)
6.3	改善系统动态性能的校正方法	(208)
6.3.1	引入速度负反馈的系统校正方法	(208)
6.3.2	引入串联校正装置的系统校正方法	(209)
6.3.3	反馈校正方法	(222)
6.4	PID 调节器	(225)
6.4.1	PID 的基本控制作用	(225)
6.4.2	PID 控制器的参数确定	(228)
6.5	MATLAB 在系统稳定性分析中的应用	(230)
6.5.1	根据闭环系统的极点 (特征根) 判定系统的稳定性	(230)

6 || 自动控制原理与技术

6.5.2 利用根轨迹判断系统的稳定性	(231)
6.5.3 利用频率特性判定系统的稳定性	(232)
6.5.4 计算相角裕度和幅值裕度	(234)
本章小结	(235)
习题	(236)

附录

附录 I 常用函数拉氏变换表	(238)
附录 II 拉氏变换的一些定理	(239)
附录 III MATLAB 函数命令索引表	(240)

1 绪 论

本章将从人工控制与自动控制过程的比较入手，简要介绍自动控制技术的发展过程与展望，自动控制的基本概念、定义及有关的名词、术语。进而引出自动控制系统的构成和分类方法，以及工程上对自动控制系统的基本要求，从而给本课程的研究对象和学习目的提供一个较为清晰的轮廓。

此外，本章还大量介绍了自动控制系统在各行业中的应用实例，以便使读者对自动控制系统实际应用的广泛性有较深的认识，并对各种不同类型控制系统的工作原理有进一步的理解，为以后各章节的学习奠定良好的基础。

1.1 引 言

自动控制学科由自动控制技术和自动控制理论两部分组成。

近几十年来，自动控制技术正在迅猛发展，并在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等领域中获得广泛的应用。随着生产和科学技术的发展，自动控制技术已渗透到各种学科领域，成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素。

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置（简称控制器）使整个生产过程或工作机械（称为被控对象）自动地按预先规定的规律运行，或使它的某些物理量（称为被控量）按预定的要求产生变化。

事实上，任何技术设备、工作机械或生产过程都必须按要求运行。例如，要想发电机正常供电，其输出的电压和频率必须保持恒定，尽量不受负荷变化的干扰；要想数控机床能加工出高精度的工件，就必须保证其工作台或刀架的进给量准确地按照程序指令的设定值变化；要使烘烤炉提供优质的产品，就必须严格地控制炉温；要使火炮能自动跟踪并命中飞行目标，炮身就必须按照指挥仪的命令作方位角和俯仰角的变动；要把数吨重的人造卫星送入数百千米高空的轨道，使其所携带的各种仪器能长期、准确地工作，就必须保持卫星的正确姿态，使它的太阳能电池一直朝向太阳，无线电发射天线一直指向地球……所有这一切都是以高水平的自动控制技术为前提条件才能实现的。

随着自动控制技术的广泛应用和迅猛发展，出现了许多新问题，这些问题要求从理论上加以解决。自动控制理论正是在解决这些实际技术问题的过程中逐步形成和发展起来的。它是研究自动控制技术的基础理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。按其发展的不同阶段，可把自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论也就是自动控制原理，是 20 世纪 40 年代到 50 年代形成的一门独立学科。早期的控制系统较为简单，只要列出微分方程并求解之，就可以用时域法分析它们的

性能。第二次世界大战前后,由于生产和军事的需要,各国均在大力研制新型武器,于是出现了较复杂的控制系统,这些系统通常是用高阶微分方程来描述的。由于高阶微分方程求解的困难,各种控制系统的理论研究和分析方法就应运而生。1932年奈奎斯特在研究负反馈放大器时创立了有名的稳定性判据,并提出了稳定裕量的概念。

在此基础上,1945年伯德提出了分析控制系统的一种图解方法即频率法,致使研究控制系统的方法由初期的时域分析转到频域分析。随后,1948年伊文斯又创立了另一种图解法即有名的根轨迹法。劳斯(1877年)和赫维茨(1895年)分别独立地提出了关于判断控制系统稳定性的代数判据。这些都是经典控制理论的重要组成部分。20世纪50年代中期,经典控制理论又添加了非线性系统理论和离散控制理论,从而形成了完整的理论体系。

从20世纪50年代开始,由于空间技术的发展,各种高速、高性能的飞行器相继出现,要求高精度地处理多变量、非线性、时变和自适应等控制问题,于是到60年代初又形成了现代控制理论。现代控制理论的基础是:1956年庞特里亚金提出了极大值原理,1957年贝尔曼提出了动态规划,1960年卡尔曼提出了最优滤波理论以及状态空间方法的应用。从20世纪60年代至今近40年来,现代控制理论又有巨大的发展,并形成了若干学科分支,如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。其中,经典控制理论以传递函数为数学工具,研究单输入、单输出的自动控制系统的分析与设计问题。主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率特性法。而现代控制理论则以矩阵理论等近代数学方法作为工具,不仅研究系统的输入、输出特性,而且还研究系统的内部特性。它适用于研究多输入、多输出的复杂系统,这些系统可以是线性的、非线性的、定常的或时变的。其主要研究方法是状态空间法。

自动控制技术的应用,推动了控制理论的发展;而自动控制理论的发展,又指导了控制技术的应用,使其进一步完善。随着科学技术的发展,自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核工业等各个学科领域。近年来,控制科学的应用范围还扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域,并对各学科之间的相互渗透起了促进作用。可以毫不夸张地说,自动控制技术和理论已经成为现代化社会的不可缺少的组成部分。自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现自动化,从而提高了劳动生产率和产品质量,降低生产成本,提高经济效益,改善劳动条件,而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。作为现代的工程技术人员和科学工作者,必须具备一定的自动控制理论基础知识。

尽管自动控制装置是各式各样的,它们的用途和具体结构也各不相同,但是它们的基本原理是一样的。本教材阐述的是建立在各种自动控制装置基础之上的统一理论,是研究自动控制共同规律的基础理论。在选材上,本教材只介绍经典控制理论的有关内容,以求为进一步深入学习自动控制有关课程及其他相关科学奠定良好的基础。

1.2 自动控制的基本概念

在许多工业生产过程或生产设备运行中，为了维持正常的工作条件，往往需要对某些物理量（如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等）进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或使其按一定规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的操作和控制，以抵消外界的扰动和影响。这种操作和控制，既可以用人工操作完成，又可以用自动控制完成。

1.2.1 人工控制与自动控制

图 1-1 所示是人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水源源不断地经出水管流出，以供用户使用。随着用水量的增多，水池中的水位必然下降。这时，若要保持水位高度不变，就得开大进水阀门，增加进水量以作补充。在本例中，进水阀的开启程度（简称开度）不是一成不变的，而是根据实际水位的多少（它反映出用水量大小）改变。上述过程可由人工操作实现。正确的操作步骤是：

(1) 将水位的要求值（期望水位值）牢记在大脑中。

(2) 用眼睛和测量工具测量水池实际水位。

(3) 将期望水位与实际水位进行比较、计算，从而得出误差值。

(4) 按照误差的大小和正负性质，由大脑指挥手去正确地调节进水阀门。所谓正确调节，是要按减小误差的方向来调节进水阀门的开度。

由于图 1-1 所示为有人直接参与控制，故称为人工控制。在本例中，水池中的水位是被控制的物理量，简称被控量。水池这个设备是控制的对象，简称对象。

人工控制的过程是测量、求误差、控制、再测量、再求误差、再控制这样一种不断循环的过程。其控制目的是要尽量减小误差，使被控量尽可能地保持在期望值附近。

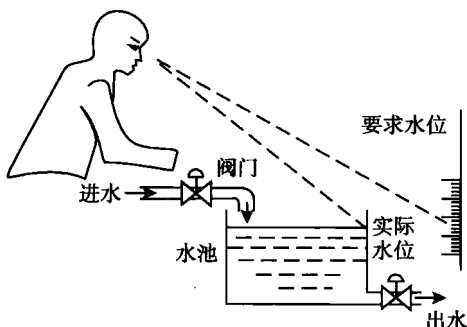


图 1-1 人工控制的恒值水位系统

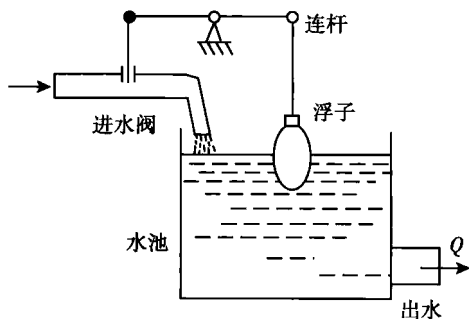


图 1-2 简单的水位自动控制系统

如果找到某种装置以完全代替图 1-1 中人所完成的全部职能，那么人就可以不直接参与控制，这就成为自动控制了。图 1-2 所示是水池水位自动控制系统的一种简单形式。

图中用浮子代替人的眼睛，作为测量水位高低之用；另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能，作为计算误差和执行控制之用。杠杆的一端由浮子带动，另一端则连向进水阀门。当用水量增大时，水位开始下降，浮子也随之降低，通过杠杆的作用，进水阀门往上提，开度增大，进水量增加，使水位能回至期望值附近。反之，若用水量变小，水位及浮子上升，进水阀关小，减少进水量，使水位自动下降至期望值附近。整个过程是在无人直接参与下进行的，所以是自动控制过程。其工作步骤可归纳为：

(1) 用连杆的长度标定好水位的期望值。

(2) 当水位超过或低于期望值时，其水位误差被浮子检测出来，并通过杠杆作用于进水阀，从而产生控制作用。

(3) 按减小误差的方向控制进水阀门的开度。

图 1-2 所示的系统虽然可实现自动控制，但由于结构简陋而存在较大的缺点，主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多，水位就越低，偏离期望值就越远，即误差越大。也就是说，控制的结果，总存在着一定范围的误差值。产生这种现象的原因可解释如下：当出水量增加时，为了使水位基本保持恒定不变，就得开大进水阀门，使较多的水流进水池以作补充。要开大进水阀，唯一的途径是浮子要下降得更多，这意味着控制的结果水位要偏离期望值更多，于是整个系统将在较低的水位建立起新的平衡状态。

为克服上述的缺点，可在原系统中增加一些设备，组成较完善的自动控制系统，如图 1-3 所示。这里，浮子仍是测量元件，连杆起着比较作用，它将期望水位与实际水位两者进行比较，得出误差，并以运动的形式推动电位器的滑块作上下移动。电位器输出电压的高低和极性充分反映出误差的性质（大小和方向）。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用控制直流伺服电动机，其转轴经减速器降速后拖动进水阀门，作为施予系统的控制作用。

在正常情况下，实际水位等于期望值，此时，电位器的滑块居中， $u_e = 0$ 。当出水量增大，如图 1-3 所示，它带动电位器滑块向上移动，输出电压 $u_e > 0$ ，经放大成 u_a ，以增大进水阀门的开度，促使水位回升。只有当实际水位恢复到期望值时，才能使 $u_e = 0$ ，控制作用才告终止。

可见，本系统的优点是：无论出水量多或少，自动控制的结果总是使实际水位的高度恒等于期望值，不致出现误差，从而大大提高了控制的精度。

上述的自动控制和人工控制是极为相似的。自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起，以代替人的职能而已。图 1-2 中的浮子相当于人的眼睛，连杆和电位器类似于大脑，电动机相当于人手等。由于这些装置负担着控制的职能，通常称之为控制器。任何一个控制系统，都是由被控对象和控制器两大部分所组成的。

1.2.2 开环控制系统

控制系统从信号传送的特点或系统的结构形式来看，可分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。图 1-4 所示的他激直流电动机转速控制系统就是一种开环控制系统。它的任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是：调节电位器 R_w

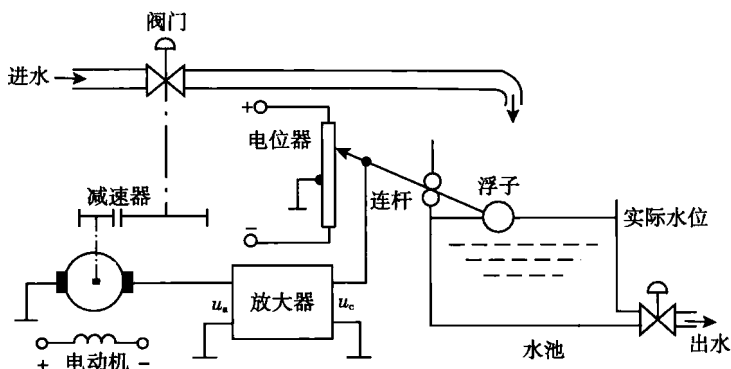


图 1-3 较完善的水位自动控制系统

的滑块，使其给定某个参考电压 u_r 。该电压经电压放大和功率放大后成为 u_a ，再送往电动机的电枢，作为控制电动机转速之用。由于他激直流电动机的转速 n 与电枢电压 u_a 成正比（对同一负载而言），因此，当负载转矩 M_c 不变时，只要改变给定电压 u_r ，便可得到不同的电动机转速 n 。换言之， u_r 与 n 具有一一对应的函数关系。

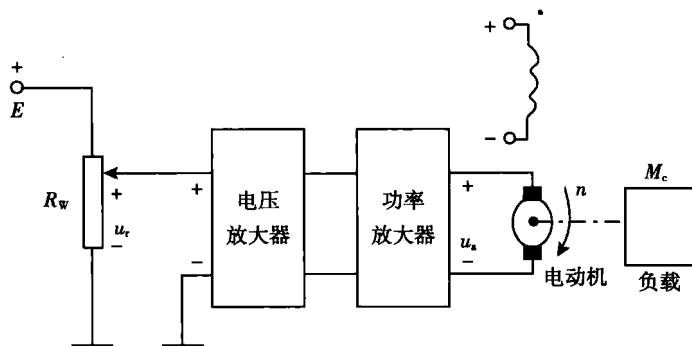


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

在本系统中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 n 是被控量。若把全系统作为整体来看，电动机转速 n 是被控对象中需要严加控制的物理量，称为系统的输出量或输出信号。 n 值的大小由参考电压所决定， u_r 是原因， n 是结果，通常把参考电压 u_r 称为系统的输入量或输入信号。

就图 1-4 而言，只有输入量 u_r 对输出量 n 的单向控制作用，而输出量 n 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系，即系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，所以称这种系统为开环控制系统。

开环直流电动机转速控制系统可用图 1-5 所示的方块图表示。图中用方块代表系统中具有相应职能的元部件，用箭头表示元部件之间信号的传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动，均会构成对输出量 n 的影响。换言之，对恒速控制系统来说，作用于电动机轴上的阻力矩 M_c 将对系统的输出起到破坏作用，这种作用称之为干扰或扰动，在图 1-5 中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

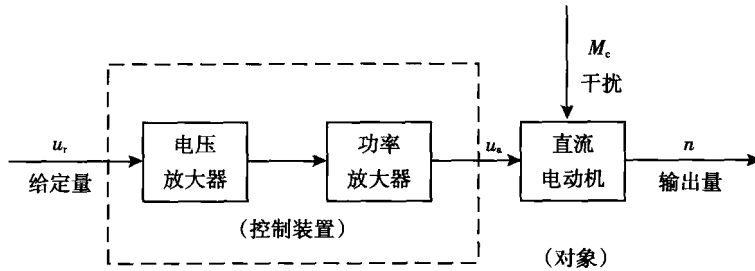


图 1-5 直流电动机转速开环控制系统方块图

开环控制系统的精度主要取决于 u_r 的标定精度以及控制装置参数的稳定程度，系统没有抵抗外部干扰的能力，故控制精度较低。但由于系统的结构简单、造价较低，故在系统结构参数稳定、没有干扰作用或所受干扰较小的场合下，仍会被大量使用。

1.2.3 闭环控制系统

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反饋回路。欲提高控制精度，就必须引入反馈环节，将输出量测出来，经物理量的转换后再反馈到输入端，使输出量对控制作用有直接影响。引入反馈回路的目的是要实现自动控制，提高控制质量。

在图 1-4 所示的直流电动机转速开环控制系统中，加入一台测速发电机，并对电路稍作改变，便构成了如图 1-6 所示的直流电动机转速闭环控制系统。

图 1-6 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 n （即系统的输出量）测量出来，并转换成电压 u_f ，再反送到系统的输入端，与给定值电压 u_r （即系统的输入量）进行比较，从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质（即大小和正负方向），通常称之为偏差信号，简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大成 u_a 后，作为电枢电压控制电动机转速 n 之用。

直流电动机转速闭环控制系统可用图 1-7 的方块图来表示。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方块图中用符号 \otimes 表示比较环节，其输出量等于各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正负号表明其极性。图 1-7 中清楚地表明：由于采用了反馈回路，致使信号的传送路径形成闭合环路，使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环，并按偏差的性质产生控制作用，以求减小或消除偏差（从而减小或消除误差）的控制系统，称为闭环控制系统，或称反馈控制系统。

闭环控制系统具有很强的纠偏功能，对干扰具有良好的适应性。就图 1-6 而论，设系统原已处在某个给定电压 u_r 相对应的转速 n 状态下运行，若一旦受到某些干扰（如负载转矩突然增大）而引起转速下降时，系统就自动地产生如下的调整过程：

